

ISSN 1817-7204(Print)
ISSN 1817-7239(Online)

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА **MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING**

УДК 338.436.33:[621.311+620.92]:004(476)
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-1-93-109>

Поступила в редакцию 28.09.2018
Received 28.09.2018

Л. С. Герасимович¹, О. Л. Сапун², А. В. Синенький¹

¹*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь*

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ АГРАРНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ РЕСУРСОВ

Аннотация: Проблема создания аграрных энергосистем носит существенно многофакторный системно-ситуационный характер в зависимости от внешнеэкономической и энергетической обстановки страны, что предопределяет ускоренное развитие автономных энергоцентров агрогородков на базе совместного использования централизованных топливно-энергетических и местных энергоресурсов. Современная методология комплексного энергообеспечения агрогородков как комплексных территориально-хозяйственных образований АПК страны, обладающих значительным техническим потенциалом местных ресурсов, включая возобновляемые источники энергии, разработана на основе соответствующего понятийного инструментария и принципов многоуровневого концептуального проектирования и имитационного моделирования комплексных энергосистем методом концептуальных экспертиз как развитого научного исследования, предпроектного технико-экономического и технико-технологического обоснования рациональной структуры концепт-проекта. В качестве приоритетного направления обоснован системный подход к разработке региональных систем пилотных проектов демонстрационных зон высокой энергоэффективности на базе высокоорганизованных агрогородков, в первую очередь экспериментально-опытных хозяйств Национальной академии наук Беларуси. Для этого в Институте энергетики Национальной академии наук Беларуси разработан программный вычислительный комплекс интеллектуальной многоуровневой системы поддержки принятия решений, обеспечивающей имитационное моделирование и обоснование рациональных сценариев концепт-проекта комплексной энергосистемы. Программный комплекс включает систему наследованных и оригинальных пакетов ПО для поэтапной процедуры выполнения вычислительных экспериментов с обоснованным диапазоном рисков исследований. Содержательность концепт-проекта зависит от требований заказчика, целей-задач исследований, отраслевой направленности агропромышленного предприятия, наличия достаточного технического потенциала местных энергоресурсов и согласованности интересов собственников, региональных и общегосударственных управляющих структур различных секторов агрогородка. Выполненные исследования на примерах ряда агропромышленных предприятий и секторов социальности агрогородков показывают существенное (до 60 %) повышение качества выбора рациональной структуры концепт-проекта комплексной энергосистемы и снижение (в 2–3 раза) трудоемкости технического проектирования по сравнению с обыкновенным 2–3-вариантным технико-экономическим обоснованием проекта. **Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственной программы «Энергетические системы, процессы и технологии», Подпрограмма 1.1 «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем», 2016–2018 годы, при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, агрогородок, энергоэффективность, энергобезопасность, комплексная энергосистема, возобновляемые источники энергии, программное обеспечение, имитационная модель, вычислительный эксперимент, риск

Для цитирования: Герасимович, Л. С. Методология научного обоснования аграрных комплексных энергосистем с использованием местных ресурсов, / Л. С. Герасимович, О. Л. Сапун, А. В. Синенький // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2019. – Т. 57, № 1. – С. 93–109. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-1-93-109>

L. S. Gerasimovich¹, O. L. Sapun², A. V. Sinenkiy¹¹*Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*²*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*

METHOD FOR SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF AGRARIAN COMPLEX ENERGY SYSTEMS USING LOCAL RESOURCES

Abstract: Problem of creating agricultural energy systems is of a significant multifactor system-and-situational nature, depending on the external economic and energy situation in the country, which predetermines accelerated development of autonomous energy centers of agro-towns based on joint use of centralized fuel and energy and local energy resources. The modern method for integrated energy supply of agro-towns as integrated territorial-and-economic entities of agro-industrial complex of the country with significant technical potential of local resources, including renewable energy sources, was developed based on appropriate conceptual tools and principles of multi-level conceptual design and simulation modeling of integrated energy systems using method of conceptual expertize as advanced scientific research, pre-project technical-and-economic and technical -and-technological substantiation of rational structure of the concept project. As a priority, a systematic approach to development of regional systems of pilot projects of demonstration areas of high energy efficiency based on highly organized agro-towns and, first of all, experimental farms of the National Academy of Sciences of Belarus is substantiated. With this purpose, the Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus has developed software-based computing complex of an intelligent multi-level decision making support system providing simulation modeling and substantiation of rational scenarios for the concept project of an integrated energy system. The software package includes system of inherited and original software packages for staged procedure for performing computational experiments with a reasonable range of research risks. The conceptual content of the project depends on the Customer's requirements, aims and objectives of the research, sectoral focus of agro-industrial enterprise, availability of sufficient technical potential of local energy resources, and the consistency of interests of the owners, regional and national governing structures of various sectors of an agro-town. The studies performed with examples of a number of agro-industrial enterprises and social and cultural sectors of agro-towns show a significant (up to 60%) improvement in quality of choosing a rational structure of a concept project for an integrated energy system and reduction (203 times) in sophistication of engineering design compared to ordinary 2-3-variant technical-and-economic substantiation of the project. **Acknowledgements.** The research was carried out within the framework of the State Program "Energy Systems, Processes and Technologies", Sub-program 1.1 "Energy Security and Reliability of Energy Systems", 2016-2018, with the support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

Keywords: agro-industrial complex, agro-town, energy efficiency, energy security, integrated energy system, renewable energy sources, software, simulation model, simulation experiment, risk

For citation: Gerasimovich L. S., Sapun O. L., Sinenkiy, A. V. Method for scientific substantiation of agrarian complex energy system using local resources. *Vestsi Natsyyanal'ny akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2019, vol. 57, no 1, pp. 93-109. (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-1-93-109>

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь разработана и реализована Программа возрождения и развития села¹. Все большее развитие получают агрогородки со специфической территориальной комплексной компоновкой производственно-хозяйственного и социально-бытового секторов сельскохозяйственных предприятий. Производственная сфера агрогородка – это объекты аграрного производства, находящиеся в пределах землепользования сельскохозяйственных организаций, центральной усадьбой которой является данный обустроенный населенный пункт.

К настоящему времени создано и обустроено около 1,5 тыс. сельских населенных пунктов, получивших статус и паспорт агрогородков.

Появляющиеся агрогородки существенно влияют на уровень современного жизнеобеспечения сельского населения, эффективность сельскохозяйственного производства и формирования топливно-энергетического баланса АПК.

Учитывая особую роль энергетики Республики Беларусь в условиях дефицита собственных топливно-энергетических ресурсов и высокой стоимости закупаемых энергоносителей (вплоть до мировых цен) и наличия местных ресурсов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ), научная разработка проблемы энергообеспечения является новой и требует научно-практического решения [1, 2].

Переход аграрной энергетики на инновационный путь развития, вовлечение в ТЭБ градообразующих агропромышленных предприятий и жилищно-коммунальной сферы агрогородков

¹ Государственная программа возрождения и развития села на 2005–2010 годы : Указ Президента Респ. Беларусь, 25 марта 2005 г., № 150 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2005. – 1/6339.

местных энергоресурсов, включая возобновляемые (МВЭР), является важной проблемой, успешное решение которой во многом будет предопределять энергоэффективность, энергобезопасность, надежность энергообеспечения, перспективы повышения конкурентоспособности аграрного производства и достойные социально-бытовые условия жизнеобеспечения сельского населения [2, 3].

Высокая энергоемкость процессов производства в АПК и потребность в различных видах энергоресурсов позволяет рассматривать вовлечение МВЭР и современных конверсионных энерготехнологий как одно из основных направлений инновационного развития систем энергообеспечения агрогородков [1, 2, 4].

В соответствии с принятым в 2015 г. «Законом об энергосбережении»², одним из основных принципов государственного управления в сфере энергосбережения в Республике Беларусь принято сооружение проектов демонстрационных зон высокой энергетической эффективности.

Демонстрационная зона высокой энергетической эффективности (ДЗВЭ) представляет собой проект (совокупность проектов), осуществляемый в масштабах района, промышленного и сельскохозяйственного предприятия, агрогородка и примыкающих сельских поселений. На этих объектах создаются благоприятные условия для получения и демонстрации совокупного эффекта за счет повышения эффективности использования и диверсификации различных топливно-энергетических ресурсов, решения организационных, технических, экономических, нормативно-правовых проблем по приоритетным направлениям энергосбережения, концентрации ресурсов производственного и научно-технического потенциала³.

Создание ДЗВЭ позволит осуществлять накопление и адаптацию зарубежного и отечественного опыта, привлечение прямых иностранных инвестиций с целью дальнейшего развития экономики и социальной сферы агропромышленного комплекса Беларуси.

Обеспечение энергоэффективности и энергобезопасности аграрного производства в новых экономических и энергетических условиях Республики Беларусь требует разработки научно-методических основ комплексного энергообеспечения и энергопотребления секторов агрогородков. При этом необходимо учитывать комплекс присутствующих здесь социально-экономических, демографических, природно-климатических, энерготехнологических факторов и региональных особенностей территориального расположения агрогородков [5].

Развитие комплексных энергосистем распределенной агроэнергетики с использованием местных ресурсов получило в странах ЕС, в первую очередь в Германии. Так, создана биоэнергетическая деревня в общине Зарбек (административный округ Мюнстер, Северный Рейн-Вестфалия, ФРГ). Проект удостоен международной премии как биоэнергетическая деревня №1 в мире. Биоэнергетический парк создавался совместно с техническим университетом Дюссельдорфа, где осуществляется широкий спектр научных исследований по повышению эффективности использования биогаза, пиролизного сжигания биосырья, использования ветроустановок и фотоэлектростанций, аккумулирования энергии. Площадь парка – 90 га, из которых 60 га используется для установок ВИЭ, а 30 га для производства сельскохозяйственных культур. Мощность всех ВИЭ составляет 29 МВт, из них 21 МВт – ветроэнергетические установки (7 агрегатов по 3 МВт), 6 МВт – фотоэлектрические станции, 2 МВт – биогазовый комплекс с твердой и жидкой ферментацией сырья. Здесь реализуется концепция высокой энергоэффективности и на 40 % снижение выбросов CO₂ в атмосферу⁴.

В Германии также разработан проект 50 биоэнергетических деревень как энергорегион №1 в Европе. В целом с 2001 г. количество энергетических товариществ в Германии увеличилось в 12 раз и составило к 2013 г. около 880. Их совместные инвестиции в европейскую экономику составили 1,5 млрд евро. Энергетические установки более чем на 50 % находятся в собственности потребителей энергии и сельхозпроизводителей⁵.

² Об энергосбережении : Закон Респ. Беларусь, 9 янв. 2015 г., № 239-З // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2015. – 2/2237.

³ Об утверждении Инструкции о порядке создания и функционирования демонстрационных зон высокой энергоэффективности Республики Беларусь : постановление Ком. по энергоэффективности при Совете Министров Респ. Беларусь, 27 янв. 2004 г., № 1 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2004. – 8/10595.

⁴ Биоэнергетические деревни [Электронный ресурс] // Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe E. V. – Режим доступа: bioenergiedorf.fnr.de. – Дата доступа: 11.10.2019.

⁵ Агентство по возобновляемой энергии : офиц. сайт [Электронный ресурс] // Agentur für Erneuerbare Energien E. V. – Режим доступа: www.unendlich-viel-energie.de. – Дата доступа: 11.10.2019.

В Российской Федерации опыт сооружения энергетических деревень более скромный. Разработана программа «Российские поместья – Эко», где предусмотрено размещение в каждом региональном проекте «национальных деревень» на территории России (В Минрегионе России проанализирован инвестиционный потенциал Калининградской области.). Эко-агропарк и поместье размещаются на площади от 30 до 300 га. Здесь располагаются объекты хозяйственной деятельности, сервисной инфраструктуры, национальные, культурные и научные центры, экспоненты и демонстрационные объекты высокой энергоэффективности⁶. Такие подходы можно рекомендовать для разработки «деревень будущего» Республики Беларусь.

При этом следует отметить работы наиболее известных советских и постсоветских ученых-аграрников, авторов научно-методических исследований и моделирования аграрных комплексных электроэнергетических систем, включая возобновляемые энергоресурсы, информационно-аналитических интеллектуальных систем управления – И. А. Будзко, И. Ф. Бородин, Р. М. Славина, Д. С. Стребкова, А. М. Мусина, И. И. Свентицкого, А. М. Башилова, В. Р. Крауспа, В. Н. Расстригина (Москва); В. Н. Карпова, С. А. Ракутько (Санкт-Петербург); И. И. Мартыненко, Б. Х. Драганова (Киев); В. И. Русана, И. И. Гируцкого, Л. С. Герасимовича (Минск); В. Н. Делягина (Новосибирск); Р. А. Амерханова (Краснодар).

Цель исследования – разработка методологии и информационно-аналитического инструментария концептуального проектирования и моделирования аграрных комплексных энергосистем с использованием местных ресурсов.

Основная часть. Агрогородки как новые территориально-хозяйственные образования, включающие сферы аграрного производства и соцкультбыта, обладают следующими особенностями, которые требуют учета при проектировании комплексных энергосистем с использованием централизованных источников электрообеспечения и местных ресурсов, включая возобновляемые источники энергии:

1) территориальная распределенность объектов аграрного производства и населенных пунктов, что определяет затраты на сооружение и эксплуатацию различных энергосетей (электрических и тепловых);

2) энергопотребителями аграрного производства являются биотехнические системы агропромышленного предприятия, а объектами труда – растения, животные, патогенные микроорганизмы и биопродукция, а длительные перерывы энергоснабжения могут наносить неустрашимый ущерб производству;

3) наличие значительных собственных местных биоресурсов; отходы аграрного производства, а точнее, вторичные биоресурсы растениеводства и животноводства, которые имеют товарную ценность (останки растениеводства, навоз животных, помет птиц, отходы переработки и др.);

4) технический и экономический доступный потенциал возобновляемых источников энергии определяется региональным расположением агрогородков, современным состоянием и перспективным развитием энерготехнологий и стоимостью установок для преобразования (конверсии) этих ресурсов;

5) нормативно-правовая база определяет возможности и экономическую целесообразность сооружения и автономных энергоцентров в пределах территорий агрогородков;

6) существующая принадлежность секторов агропромышленного производства, жилищно-коммунального и социокультурного секторов агрогородков к различным управляющим структурам (министерствам и ведомствам) требует согласования интересов собственников и государственных систем электро- и газоснабжения с позиции комплексного энергообеспечения агрогородков;

7) требования согласованности систем комплексного энергообеспечения и энергопотребления сложных взаимозависимых энергосистем агрогородков определяет в конечном итоге необходимость использования интеллектуального управления нагрузками секторов агрогородков.

Отсутствие нормативно-правовой базы проектирования комплексного энергообеспечения агрогородков как современного территориально-хозяйственного образования затрудняет проектирование существующих и строительство новых агрогородков, что определяет разработку

⁶ В апреле Минрегион проанализировал инвестиционный потенциал 10 регионов РФ [Электронный ресурс] // Федеральная база инвестиционных площадок. – Режим доступа: <http://www.fbip.ru/articles/newsdetails/id/2323>. – Дата доступа: 11.10.2019.

методологии научного обоснования сложных аграрных энергосистем с использованием местных ресурсов [5].

Разработка методологии как совокупности методов и способов исследования и практических рекомендаций в области комплексного энергообеспечения и энергопотребления секторов агрогородков выполняется коллективами Института энергетики Национальной академии наук Беларуси и Белорусского государственного аграрного технического университета с 2011 г.

Методологической базой исследований является комплексный энергоэкономический метод и метод системного анализа аграрной энергетики⁷ [4, 6].

В соответствии с этими методами энергосистема агрогородков рассматривается как часть общеэнергетической системы Беларуси. Она представляет собой единую совокупность взаимосвязанных специализированных подсистем, систем электро-, тепло- и газоснабжения, а также подсистем снабжения различными видами твердого и жидкого топлива, а также подсистем, основанных на использовании местных и возобновляемых энергоресурсов и энергоносителей. При этом данные Государственного кадастра возобновляемых источников энергии⁸ имеют, как правило, слишком обобщенный характер, поэтому они требуют регионального уточнения [4–7].

При разработке комплексного энергообеспечения, энергоэффективности и энергобезопасности агрогородков в качестве базовых приняты основополагающие документы, определяющие социально-экономическое развитие Беларуси и безопасное энергетическое обеспечение страны на период до 2020 г.

Концептуальные и методические подходы к решению проблемы. Для информационной технологии требуется методика оценки энергосистем агрогородков (ЭСА), обеспечивающая мониторинг их состояния и энергоэкономический анализ в процессе имитационного моделирования, облегчающая принятие решений при планировании научно-инновационной деятельности в целях повышения энергоэффективности и энергобезопасности агрогородков.

В настоящее время нет вполне удовлетворительной методики такой оценки, которая гарантирует безошибочность обоснования не только отдельных мероприятий инновационной направленности, но и в целом курса инновационного развития агроэнергетики в республике.

Проблема состоит в том, что обычно определение энергоэффективности научно-инновационной деятельности в агроэнергетике сводится к оценке эффективности отдельных, связанных с ее осуществлением показателей: капитальных вложений, текущих энергозатрат, технико-экономического обоснования разрабатываемых инновационных проектов либо бизнес-планов и т. д. [1, 8]. Однако в этом случае с их помощью нельзя дать объективную, системную долгосрочную оценку энергоэффективности научно-инновационной деятельности. Последнее особенно заметно при раздельном несистемном планировании, определении и оценке эффективности научных исследований и внедрения их результатов в аграрное производство. При этом агроэнергетика испытывает все большие трудности, связанные с вынужденным импортом научных достижений в АПК, предотвращением технологической и финансовой зависимости от развитых стран, наиболее продвинутых в технико-технологическом и экономическом отношениях.

Оценить должным образом энергоэффективность научно-инновационной деятельности в аграрной энергетике с помощью частных взаимно несвязанных методик практически невозможно. Необходима единая методология сквозной методики и совокупность методических приемов оценки и повышения энергоэффективности агрогородков, охватывающих полный непрерывный цикл научно-инновационного процесса повышения энергоэффективности системы комплексного энергообеспечения агрогородков и соответствующая им система мониторинга [3, 5].

В исследовании приняты следующие методические подходы к решению этой проблемы [6, 9, 10].

Первый принцип – предусматривает сквозное определение и оценку энергоэффективности научно-инновационной деятельности каждого мероприятия в рамках всего цикла, начиная от

⁷ Экономика организаций и отраслей агропромышленного комплекса : в 2 кн. / В. Г. Гусаков [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т экономики НАН Беларуси, Центр аграр. экономики ; под общ. ред. В. Г. Гусакова. – Минск : Белорус. наука, 2007. – Кн. 1. – 891 с. ; Герасимович Л. С. Системный анализ агроэнергетики : курс лекций. – Минск : Техно-принт, 2004. – 127 с.

⁸ Государственный кадастр возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] // НИРУП «Институт прикладных программных систем». – Режим доступа: <http://www.ipps.by:9083/apex/f?p=105>. – Дата доступа: 11.10.2018.

зарождения научной идеи на основании результатов научных исследований, анализа мировых достижений или полученной эвристическим и экспертным путем и кончая утилизацией произведенного на ее основе инновационного технико-технологического решения, завершившего свой жизненный цикл.

Второй принцип (не менее важный) – соблюдение приоритета народнохозяйственного подхода к научно-инновационной деятельности. Это объясняется неуклонно возрастающей системной ролью государства в развитии науки и инноваций, проявляющейся в различных формах, в том числе прямое участие в финансировании инновационных программ.

Третий принцип (методологический) – придание приоритета народнохозяйственной эффективности в обязательном порядке должно сопровождаться обеспечением надлежащего уровня коммерческой эффективности, при которой отдельные хозяйствующие субъекты были бы заинтересованы участвовать в научно-инновационной деятельности.

Четвертый принцип – определение и оценка эффективности научно-инновационной деятельности, применение для этого достоверных, преимущественно прогнозных, ожидаемых показателей. Здесь необходимы особые методические приемы системного анализа и оценки показателей эффективности.

Пятый принцип – определение направлений и оценки научно-инновационной деятельности на прогнозный период, требование полного и точного учета неопределенностей и рисков, которые всегда сопровождают разработку и осуществление проектов комплексного энергообеспечения. Эти риски могут быть учтены посредством внесения соответствующих поправок в норму дисконта технико-экономических расчетов инновационного проекта.

В этом случае необходимы методы предварительной укрупненной оценки устойчивости инновационных проектов, расчета уровней безубыточности, вариации параметров и оценки ожидаемого эффекта с учетом количественных характеристик неопределенности.

Шестой принцип – соблюдение требования поэтапного проведения расчетов на различных уровнях научно-инновационного цикла проекта.

Первые стадии носят *концептуальный*, но не менее ответственный характер расчетов с оценкой энергоэффективности СКЭОА в целом, а схема финансирования намечается лишь в общих чертах по аналогии с подобными проектами или на основе использования различных программных продуктов для концептуального моделирования как расширенного этапа предпроектного технико-технологического и технико-экономического обоснования концепт-проекта.

На последующих двух стадиях технического проектирования неуклонно повышаются требования к достоверности исходных данных, так же как и к предполагаемым инвесторам и участникам проекта.

Методология СКЭОА разработана на основе системотехнического подхода и обеспечивает решение следующих задач:

- 1) сбор и анализ основных показателей хозяйственной деятельности, энергообеспечения различных агрогородков и потенциала региональных местных и возобновляемых ресурсов;
- 2) разработка метода концептуального проектирования и комплекса информационно-аналитических исследований как инструментария предпроектного научного обоснования энергоэффективной структуры комплексных энергосистем;
- 3) разработка комплекса моделей и программного обеспечения для компьютерного моделирования эффективности сложных гибридных энергосистем кластеров когенерационных установок различных типов агрогородков;
- 4) концептуальное моделирование и анализ чувствительности и риска комплексных энергосистем, включая, в первую очередь, экспериментально-опытные хозяйства научно-практических центров Национальной академии наук Беларуси как демонстрационные зоны высокой энергоэффективности (ДЗВЭ) СКЭОА с МВЭР [11, 12].

Как следствие, конечным итогом такой научно-исследовательской и инновационной деятельности является разработка нормативно-правовой базы рационального комплексного энергообеспечения агрогородков.

Методология требует формулирования следующих основополагающих понятий предметной области.

Объектом исследования в работе принята энергосистема агрогородка как совокупность взаимосвязанных подсистем, выполняющих функции приобретения, преобразования, распределения и потребления различных видов энергии, эксплуатационно-ремонтного обслуживания энергопотребителей производственного и социально-бытового секторов на основе представления ее как системно-сложного объекта. Этот объект является сложной системой и обладает системными свойствами, такими как иерархичность, целостность, самоорганизованность, динамичность, нестационарность, многокритериальность, неопределенность и адаптивность [1].

Для энергосистем агрогородков основными системообразующими факторами являются энергоэффективность производственного сектора и соблюдение социальных стандартов социально-бытовой сферы [1, 8]. При этом свойства энергоэкономичности должны выполняться с минимальными (оптимальными) затратами энергетических и других ресурсов, выполнять свои функции в требуемом объеме в нормальных условиях и в периоды нештатных ситуаций под влиянием внутренних и внешних угроз.

Предметом исследования является энергоэффективность системы комплексного энергообеспечения агрогородка (СКЭОА) с использованием местных и возобновляемых энергоресурсов (МВЭР) с учетом внешних и внутренних технических и социально-экономических факторов аграрного производства и быта сельского населения [3].

Основные понятия и определения системного анализа агрогородков сформулированы на основе общей и прикладной теории систем применительно к области энергетики и экономики сельского хозяйства.

Методология СКЭОА с МВЭР – это система методов, способов и путей обеспечения высокой энергоэффективности энергосистемы при определенных (согласованных) требованиях и критериях значимости.

Агрогородок – благоустроенный населенный пункт с производственной и социальной инфраструктурой, обеспечивающий проживающему на его территории населению производственные задачи градообразующей аграрной сферы; государственные социальные стандарты сельского населения.

Энергосистема агрогородка – это организационно-техническая (эргатическая) система комплексного энергообеспечения, включающая подсистемы энергоснабжения и энергопотребителей агрогородков.

Энергопотребители агрогородков – это энергоприемники агропромышленного предприятия, территориально обособленные юридические лица (абоненты): предприятия, малого бизнеса; социально-культурные учреждения и комплексы; владельцы жилых домов и квартир.

Энергоприемники – это энергоприсоединения потребителей к системе энергоснабжения, использующих энергию для собственных нужд.

Система энергообеспечения агрогородков – это совокупность взаимосвязанных энергогенерирующих и потребительских энергоустановок, включающая в себя централизованную электроэнергетическую систему, автономные энергоцентры и локальную сеть электро- и энергоснабжения транспортной и мобильной сельскохозяйственной техники, стационарного технологического оборудования и поставку местных топливных ресурсов, *комплексной энергосистемы агрогородка*.

Основные подсистемы комплексной энергосистемы :

- 1) электрооснабжение от централизованного и/или автономного электро- и теплоснабжения, горячего и холодного водоснабжения;
- 2) центральное и/или местное резервное электроснабжение;
- 3) заготовка, транспорт, снабжение подготовка (рафинирование) местных топливных ресурсов;
- 4) система потребительских энергоустановок, обеспечивающих технологические процессы агропромышленного производства и ЖКХ.

Технические требования к системе энергоснабжения агрогородков включают следующие показатели: технико-технологические назначения видов энергии; суммарную установленную мощность энергоприемников; установленный максимум энергетической нагрузки; графики энергопотребления по видам энергии (получасовой, сутки, месяц, сезон, год); условия энергоснабжения (погодно-климатические, категории потребителей и др.).

Таким образом, энергосистема агрогородка представляет собой единый организационно-технический и энерготехнологический комплекс разнородных элементов оборудования со сложной схемой технологических и информационно-управляющих связей с различным уровнем организованности [1, 4].

В этой системе одновременно протекают и взаимодействуют различные физико-химические, тепло-массообменные, электротехнологические и другие процессы преобразования (коверсии) различных видов энергии первичных ресурсов в конечные виды энергии, обеспечивающие все механические тепло- и электротехнологические производственные процессы воздействия конечных видов энергии с заданными параметрами на многочисленные объекты труда и операции.

При решении целей-задач комплексного энергообеспечения агрогородков целесообразно использовать методологию системно-ситуационного подхода, который является одним из ведущих направлений в исследовании сложных систем. Они принадлежат к целенаправленно развивающимся высокоорганизованным множествам сложной структуры, таким как биологические объекты труда, технологические процессы и социально-экономические отношения [1, 4].

В методологии системных исследований особое место занимают вопросы описания строения (структуры) систем, которые опираются на фундаментальные понятия этих объектов: элементы, связи, структура, внешнюю среду, внутренние и внешние связи, границы системы, замкнутую и открытую системы, целевую функцию иерархичность строения и управляемость системы и другие понятия [1].

Центральным вопросом методологии системных исследований является процесс многовариантной количественной оценки альтернатив построения и функционирования системы [7, 13].

Вместе с тем, такая энергосистема является человеко-машинной (эргатической), поскольку включает людей в ее управляющую часть и в структуру отдельных подсистем. Поэтому одной из важнейших проблем построения современной организационно-технической системы является оптимальное распределение функций между человеком и техническими средствами, а в обозримом будущем – передача многих функций к интеллектуальным техническим системам управления.

Важнейшим аспектом системных исследований является изучение основных свойств сложных систем. Такое изучение энергосистем агрогородков позволяет найти характерные обобщающие свойства функционирования и соответствующие структуры систем данного вида.

Основные свойства комплексной энергосистемы агрогородков можно разделить на четыре основные группы [14]:

I группа структурных свойств системы – целостность, целевая согласованность, централизация и сложность;

II группа свойств – характеризует структурную стабильность, инерционность и устойчивость и мультидискретность системы;

III группа свойств – энергоэффективность энергоэкономичность, энергобезопасность и надежность системы;

IV группа свойств – неопределенность информации управляемости, адаптивности и многокритериальности системы.

С учетом представленных свойств энергосистему агрогородка следует рассматривать как системно-сложный объект, требующий системотехнических исследований. Эту систему следует рассматривать как сложную совокупность взаимосвязанных подсистем энероснабжения и энергопотребления, следовательно, как систему комплексного энергообеспечения.

Энергосистема агрогородка как сложная система является частью более общей системы топливно-энергетического комплекса страны, определяющей цели и ограничительные рамки ее сооружения, функционирования и развития. С другой стороны, выбор наилучшего пути приспособления исследуемой системы к постоянно меняющимся внешним условиям совпадает с целью системно-ситуационного подхода.

Среди связей с локальными системами, характеризующими регион, весьма многочисленны и разнообразны связи с общегосударственными системами, отражающими возможности и ограничения страны по стоимости энергооборудования отечественного производства или закупки импортного. Решение задач комплексного энергообеспечения агрогородков требует получения необходимой информации о параметрах этих связей, а их анализ позволяет очертить границы

исследуемой системы. Принципиально важна методика концептуального проектирования как предпроектного научного исследования структуры энергосистемы агрогородка по совокупности обобщенных количественных и качественных параметров и показателей с использованием ограниченного числа критериев значимости, который бы давал достоверную комплексную оценку эффективности концепт-проекта [8, 11].

Такие показатели можно использовать для различных целей концептуального проектирования: при разработке математических моделей, учитывающих влияние на главную цель функционирования СКЭОА; при ранжировании инвестиционных проектов с целью обоснования приоритетных направлений капитальных вложений и технико-технологических решений; при подведении итоговых результатов функционирования ДЗВЭ и др.

Параметры и обобщенные удельные показатели эффективности конверсионных энерготехнологий производства электро- и тепловой энергии представлены в табл. 1.

Основные этапы системных исследований СКЭОА:

- предпроектное обоснование и анализ системы управления концептуальным проектированием объекта;
- методология постановки целевых задач и выбор критериальных функций;
- алгоритмизация и программирование задач и процессов концептуального проектирования;
- моделирование и оценка полученных результатов.

При этом активно используется методика информационно-аналитической технологии и системотехнические принципы концептуального моделирования СКЭОА с использованием многоуровневого программного комплекса наследованных и оригинальных расчетных пакетов ПО [11].

Разрабатываемая информационная технология исследования сложных технических систем СКЭОА с МВЭР должна отвечать последним инновационным достижениям науки и техники [15, 16]. Это приводит к необходимости повышения качества возрастающих объемов проектных работ и, соответственно, предпроектного концептуального проектирования и моделирования этих систем.

Цель-задачи информационной технологии – разработка концепт-проекта ДЗВЭ СКЭОА с МВЭР – обеспечить выбор рациональных параметров и показателей эффективности с учетом функциональным характеристикам конверсионных энергоустановок (рис. 1) [10, 17–21].

В основе модели ДЗВЭ лежат векторные (многокритериальные) задачи математического программирования с использованием наследованных и оригинальных пакетов ПО. Такая информационная технология процесса построения и исследования модели в процессе принятия решений предназначена для анализа и синтеза СКЭОА на основании задания на концепт-проект с учетом особенностей эксплуатации таких систем и перспектив социально-экономического и энергетического развития секторов агрогородка.

В сферу пилотных проектов ДЗВЭ входит:

- приобретение опыта проектирования и сооружения СКЭОА и инновационных объектов высокой энергоэффективности;
- организация показа действующего прогрессивного энергоэффективного оборудования, технологий и материалов;
- проведение региональных конкурсов, семинаров, конференций, форумов, других тематических мероприятий в рамках компетенции ДЗВЭ;
- представление потребителям и производителям топливно-энергетических ресурсов информации по вопросам энергосбережения;
- учебно-научный процесс, повышение квалификации руководителей и специалистов-энергетиков различного уровня;
- информирование потребителей о классах и соответствие энергетической эффективности требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации, способах экономии тепловой и электрической энергии;
- максимальное развитие распределенной генерации и энергоисточников на местных видах топлива (прежде всего биосырья: древесины, торфа, отходов животноводства, растениеводства и пищевой промышленности);

Таблица 1. Параметры и обобщенные удельные показатели эффективности конверсионных энерготехнологий производства электро- и тепловой энергии
 Table 1. Parameters and generalized specific indicators of efficiency of conversion energy technologies for electricity and heat energy production

Технология	Исходные данные							Экономический расчетный срок эксплуатации, лет			Себестоимость, центов США/кВт-ч, для дисконтной ставки		
	Характерная установленная мощность, МВт	Инвестиционные затраты, долл/кВт	Удельные эксплуатационные затраты, постоянные, долл/кВт-ч и переменные, цент/кВт-ч	Стоимость сырья, долл/ГДж	Коэффициент полезного действия (тепловой), %	Коэффициент полезного действия, %							
	Электроэнергия												
Биоэнергия													
Бытовое отопление брикетами	0,005–0,1	310–1200	13–43	10–20	86–95	13–29	10–20	14–70	15–77	16–84			
Сжигание твердых бытовых отходов на мини-ТЭЦ	1–10	370–3000	15–130	0–3	20–40	80–91	10–20	1,4–34	1,8–38	2,1–41			
Сжигание	12–14	370–1000	1,2–2,5	3,7–6,2	10–40	63–74	10–20	10–69	11–70	11–72			
БГК с КГУ	0,5–5	170–1000	37–140	2,5–3,7	20–30	68–91	15–25	10–29	10–30	10–32			
Солнечная энергия													
Гелиоколлектор ГВС	0,0017–0,01	120–540	1,5–10	–	20–80	4,1–13	10–15	2,8–56	3,6–67	4,2–75			
Гелиоколлектор ГВС с теплоаккумулятором, комбинированные системы	0,0017–0,07	530–1800	5,6–22	–	20–80	4,1–13	15–25	8,8–134	12–170	16–200			
Тепловые насосы	0,01–0,35	900–3800	7,8–8,9	–	–	25–30	20	14–42	17–56	19–68			
Тепловая энергия													
Биоэнергия													
Бытовое отопление брикетами	0,005–0,1	310–1200	13–43	10–20	86–95	13–29	10–20	14–70	15–77	16–84			
Сжигание твердых бытовых отходов на мини-ТЭЦ	1–10	370–3000	15–130	0–3	20–40	80–91	10–20	1,4–34	1,8–38	2,1–41			
Сжигание	12–14	370–1000	1,2–2,5	3,7–6,2	10–40	63–74	10–20	10–69	11–70	11–72			
БГК с КГУ	0,5–5	170–1000	37–140	2,5–3,7	20–30	68–91	15–25	10–29	10–30	10–32			
Солнечная энергия													
Гелиоколлектор ГВС	0,0017–0,01	120–540	1,5–10	–	20–80	4,1–13	10–15	2,8–56	3,6–67	4,2–75			
Гелиоколлектор ГВС с теплоаккумулятором, комбинированные системы	0,0017–0,07	530–1800	5,6–22	–	20–80	4,1–13	15–25	8,8–134	12–170	16–200			
Тепловые насосы	0,01–0,35	900–3800	7,8–8,9	–	–	25–30	20	14–42	17–56	19–68			

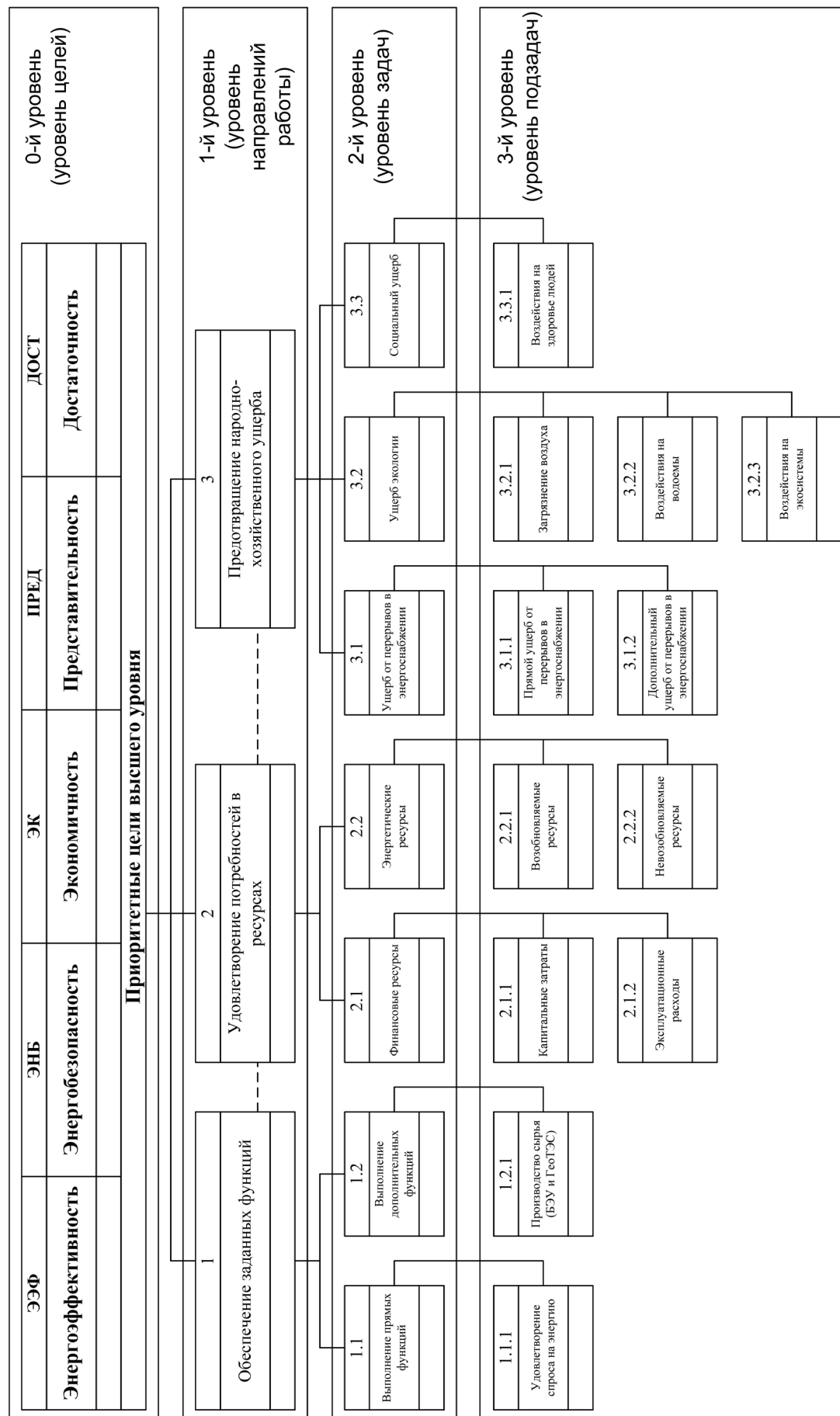


Рис. 1. Переработанная система целей-задач проектов ДЗВЭ с МВЭР

Fig. 1. Revised system of aims and objectives for projects of energy efficiency demonstration zones with local and renewable energy resources

Такой подход развития распределенной энергетики агрогородков не противоречит перспективному развитию атомной энергетики, а рационально дополняет развитие государственной электроэнергетической системы в Республике Беларусь. Использование электроэнергии, вырабатанной на БелАЭС, особенно при массовом использовании электротеплоснабжения производственных помещений и ЖКХ электропотребителей агрогородков, проблематично в связи с существующей ограниченной пропускной способностью и необходимостью массовой модернизации протяженных общегосударственных электросетей [22].

Блок-схема формирования информационных ресурсов ИАС (рис. 2) включает базу данных (БД) и базу знаний (БЗ), модели анализа и оценки в зависимости от внешних и внутренних факторов. В свою очередь, эти модели включают БД1 внутренних факторов (социальные, политические, технико-технологические, природные и энергетические факторы), а БД2 внутренних факторов содержит сведения о конкурентной поставке основного энергооборудования, поставщиках и потребителях информационных ресурсов.

Методология исследования ДЗВЭ включает следующие иерархические уровни взаимосвязанных процедур подготовки и моделирования [11]:

1-й уровень (объединенная информационная база данных, банка знаний и СУБД. Включает законодательную и нормативно-правовую базу; наследованные и оригинальные пакеты ПО поддержки принятия решений, инструкции пользователей и примеры расчетов; структуру и основные показатели производственного, жилищно-коммунального и социально-культурного секторов агрогородков; систему государственного энергоснабжения региона (области) и региональный потенциал местных ресурсов, включая ВИЭ⁹ [7, 11, 23]; перспективные конверсионные энерго-

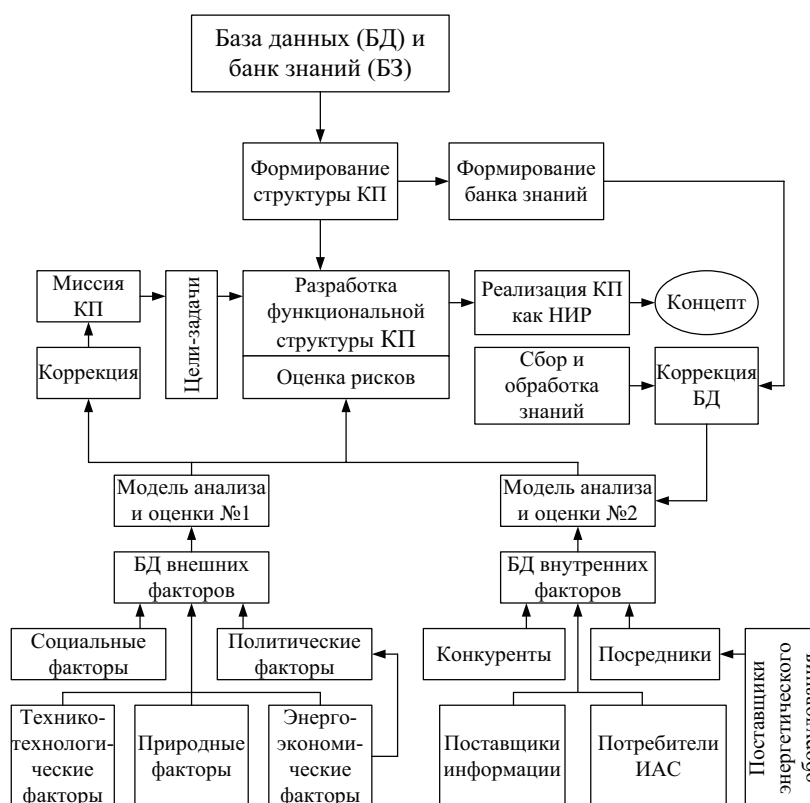


Рис. 2. Блок-схема алгоритма постановки и решения задач

Fig. 2. Diagram of algorithm for task definition and solving

⁹ Войтов И. В., Гатих М. А., Рыбак В. А. Научно-инновационный метод оценки и оптимизации управления эколого-экономической эффективностью рационального природопользования // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Приклад. науки. – 2008. – № 6. – С. 129–138; Сидоренко Г. И. Основы и методы определения комплексного потенциала возобновляемых энергоресурсов региона и его использования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.08. – СПб., 2006. – 314 с.

установки и фирмы-производители. Для заполнения БД разработан подробный опросный лист, включая контактные данные и ведомственную подчиненность секторов агрогородка и все необходимые первичные хозяйственно-экономические и энергетические показатели и данные.

2-й уровень – предварительный анализ альтернатив комплексной энергосистемы. Принимается для поддержки принятия решений основных направлений концептуального эвристического моделирования СКЭОА с использованием качественно-количественного метода анализа иерархий (МАИ), ПО Expert Choise и др.

3-й уровень – планирование и прогнозирование развития комплексной энергосети агрогородка. Выполняется методом имитационного моделирования с оптимизацией узлов комплексной энергосети с учетом влияния ценовой политики поставщиков централизованных видов ТЭР и местных энергоресурсов и перспективных социально-экономических программ секторов агрогородков [6, 10, 17, 18, 23–25].

Для моделирования адаптирован наследованный модуль ПО BALANCE ENPER для Windows. Пакет состоит из 10 модулей и широко использован во многих странах для энергетического, экономического и экологического анализа энергетических сетей на уровне страны, региона и предприятия.

4-й уровень – выбор и принятие решений для инновационного развития комплексной энергосистемы. Выполняется методом эвристического блочного структурно-функционального и функционально-стоимостного моделирования энергосистемы. Он обеспечивает системный анализ существующей энергосистемы («как есть»), выбор сценариев и оценку разрабатываемых инновационных технико-технологических и организационно-технических решений в процессе бизнес-планирования и реинжиниринга энергосистемы («как надо») с использованием наследованного пакета ПО ALLFusion Process Modeler (BPwin и ERwin), который широко используется для моделирования различных бизнес-процессов [7, 15, 17].

5-й уровень – концептуальное (предпроектное) обоснование энергосберегающих проектов и мероприятий (включая инновационные генерирующие и потребительские энергоустановки). При этом обеспечивается энергоэкономический экспресс-анализ с использованием эвристико-кибернетического метода экспертной оценки приоритетности разрабатываемых альтернатив. Он предназначен для автоматизированного расчета системы (приоритетного ряда) энергосберегающих энергопотребительских проектов (АРЭП) [1] после анализа энергобаланса (уровень 3) и структурно-функционального бизнес-планирования повышения энергоэффективности ЭСА (уровень 4).

Весь программный комплекс выполнен в виде информационного хранилища WEB-сайта «Аграрная энергетика» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси с функциями редактирования БД и пополнения БЗ, предназначенных для разработчиков концепт-проекта, а также в качестве консультанта с правом доступа заказчиков и других потребителей.

Разработанная методология, опробованная на основе концептуального моделирования и вычислительных экспериментов, существенно повышает эффективность проектирования комплексных энергосистем агрогородков и дало положительные результаты при оценке альтернативных сценариев концепт-проектов различных агрогородков: «Дашковка», Могилевский р-н; «Путчино», Дзержинский р-н; «Торгуны», Докшицкий р-н; комплекс КРС «Голицы» агропромышленного предприятия «Винец», Березовский р-н.

В качестве примера разработки концепт-проекта комплексной энергосистемы ОАО «Торгуны» Докшицкого района представлена таблица рационального сценария системы конверсионных установок (табл. 2).

Следует отметить, что в рассматриваемом примере достаточно высокая стоимость зарубежного энергооборудования не позволяет снизить срок окупаемости до 5–6 лет.

Результаты исследований использованы также при проектировании сооружения экспериментального гелиоэнергетического стенда на крыше 5-этажного здания Института энергетики Национальной академии наук Беларуси. Стенд в качестве ДЗВЭ включает автоматизированный комплекс конверсионных установок с использованием солнечной энергии. Фотоэлектростанция с компоновкой солнечными модулями различных производителей и тепловой гелиоколлектор

на тепловых трубах китайского производства используются для длительных эксплуатационных исследований, имитационного моделирования и разработки методики оценки соответствия действующих и проектируемых гелиоэнергетических конвертируемых энергоустановок для работы в условиях Республики Беларусь.

Таблица 2. **Согласованный состав оборудования концепт-проекта ОАО «Торгуны»**Table 2. **Agreed set of equipment for the concept project of JSC «Torguny»**

Объект	Назначение	Установки	Мощность (производительность)	Стоимость
Территория	Производство пеллет	Дробилка, камера сушки, пеллетайзер	1т/ч	1,1 млн евро
ОАО «Торгуны»	Выработка электрической и тепловой энергии	Биогазовый комплекс	366 кВт _{эл}	1,2–1,4 млн евро
Дом механизатора		Котел, солнечный коллектор, фотоэлектрическая станция		58 тыс. евро
Детский сад	Выработка тепловой энергии	Тепловой насос, твердотопливный котел, солнечный коллектор, система ГВС		41 тыс. евро
Школа				57 тыс. евро
Многоквартирные дома (8 домов) и Дом культуры		Твердотопливный котел	1, 25 МВт	230 тыс. евро
Одноквартирные дома	Выработка электрической и тепловой энергии	Три решения, различающихся стоимостью и эффективностью		5–15 тыс. евро

Выводы

1. Разработанная методология научного обоснования аграрных комплексных энергосистем и опыт адаптации зарекомендовавших себя на практике наследованных и оригинальных пакетов ПО информационно-аналитические системы показали, что она обеспечивает системное концептуальное моделирование комплексного энергообеспечения агрогородков.

2. Опыт многофакторного моделирования комплексных энергосистем агрогородков с использованием местных ресурсов показал существенное повышение качества и снижение трудоемкости предпроектного технико-экономического обоснования концепт-проектов. Полученные относительно высокие сроки окупаемости проектов (6–9 лет и более) связаны, с одной стороны, с высокой стоимостью зарубежного конверсионного энергооборудования, а с другой стороны, являются основанием для целенаправленной разработки научных направлений по дальнейшему развитию распределенной агроэнергетики в Республике Беларусь через систему демонстрационных зон высокой энергоэффективности и налаживания промышленного производства отечественных конверсионных установок.

3. Действующий экспериментальный автоматизированный гелиоэнергетический стенд Института энергетики Национальной академии наук Беларуси следует использовать для продолжения исследований имитационного моделирования для оценки соответствия эксплуатационным требованиям сооруженных и проектируемых гелиоустановок для работы в условиях Республики Беларусь.

Разработанная методология имеет значимость для науки, проектной практики и новых образовательных интеллектуальных информационно-аналитических технологий при анализе и синтезе аграрных комплексных энергосистем с использованием местных ресурсов АПК и согласуется с планируемыми изменениями в законодательной сфере использования возобновляемых источников энергии¹⁰.

¹⁰ О планируемых изменениях в законодательстве в сфере использования возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] // М-во энергетики Респ. Беларусь : офиц. сайт. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.by/o-planiruemyyh-izmenenijah-v-zakonodatelstve-v-sfere-ispolzovanija-vozobnovljaemyh-istochnikov-jenergii/>. – Дата доступа: 11.10.2019.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы «Энергетические системы, процессы и технологии», Подпрограмма 1.1 «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем», 2016–2018 годы, при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список использованных источников

1. Энергоэффективность аграрного производства / В. Г. Гусаков [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Отд-ние аграр. наук, Ин-т экономики, Ин-т энергетики ; под общ. ред. В. Г. Гусакова, Л. С. Герасимовича. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 775 с.
2. Русан, В. Технично-экономическая эффективность использования возобновляемых источников энергии / В. Русан, Еид Хассан // Энергетика и ТЭК. – 2014. – № 11. – С. 38–41.
3. Герасимович, Л. С. Энергетическая эффективность системы комплексного энергообеспечения агрогородков Республики Беларусь / Л. С. Герасимович, О. Л. Сапун // Актуал. проблеми інновац. економікі. – 2018. – № 2. – С. 10–15.
4. Экономика организаций и отраслей агропромышленного комплекса : в 2 кн. / В. Г. Гусаков [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т экономики НАН Беларуси, Центр аграр. экономики ; под общ. ред. В. Г. Гусакова. – Минск : Беларус. навука, 2007. – Кн. 1. – 891 с.
5. Герасимович, Л. С. Концептуальное проектирование систем комплексного обеспечения агрогородка с использованием местных и возобновляемых ресурсов / Л. С. Герасимович, Ю. И. Ланкевич, А. В. Синенький // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2014. – № 4. – С. 103–108.
6. Разработка методических положений по определению эффективности систем энергоснабжения объектов АПК с использованием НВИЭ : отчет о НИР (заключение) / Краснодар. политехн. ин-т ; рук. В. С. Симанков. – Краснодар, 1989. – 204 с.
7. Симанков, В. С. Системный анализ при решении структурных задач альтернативной энергетики / В. С. Симанков, Т. Т. Зангиев. – Краснодар : Ин-т соврем. технологий и экономики, 2001. – 151 с.
8. Комплексное энергообеспечение агрогородков Могилевской области / Л. С. Герасимович [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2009. – № 1. – С. 99–105.
9. Войтов, И. В. Научно-инновационный метод оценки и оптимизации управления эколого-экономической эффективностью рационального природопользования / И. В. Войтов, М. А. Гатих, В. А. Рыбак // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Приклад. науки. – 2008. – № 6. – С. 129–138.
10. Рыбак, В. А. Система поддержки принятия решений в области управления параметрами экологичности промышленных проектов / В. А. Рыбак, А. Шопр // Scientific achievements of the third millennium : coll. of sci. papers on materials III Intern. sci. conf., San Francisco, 31 July, 2016 / Intern. Research Federation “Science public”. – San Francisco, 2016. – P. 38–42. <https://doi.org/10.18411/scc2016-3-10>
11. Принципы создания демонстрационных зон высокой энергоэффективности с использованием местных и возобновляемых ресурсов в системе комплексного энергообеспечения агрогородков / В. Н. Комашко [и др.] // Энергет. стратегия. – 2014. – № 6. – С. 49–54.
12. Sargent, R. G. Verification and validation of simulation models / R. G. Sargent // Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, December 4–7, 2005 / ed.: M. E. Kuhl [et al.] ; Assoc. for Computing Machinery, Inst. of Electrical a. Electronics Eng. – New York ; Piscataway, 2005. – P. 130–143. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574246>
13. Воропай, Н. И. Многокритериальный анализ решений при планировании развития электроэнергетических систем / Н. И. Воропай, Е. Ю. Иванова // Электричество. – 2000. – № 11. – С. 2–9.
14. Безруких, П. П. Основные методические положения выбора демонстрационных объектов возобновляемой энергетики (на примере Республики Карелия) / П. П. Безруких, Г. И. Сидоренко // Энергет. политика. – 2004. – № 4. – С. 8–21.
15. Подковальников, С. В. Нечеткая платежная матрица для обоснования решений в энергетике в условиях неопределенности / С. В. Подковальников // Изв. Рос. акад. наук. Энергетика. – 2001. – № 4. – С. 164–173.
16. Воропай, Н. И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы / Н. И. Воропай // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3 (20). – С. 11–16.
17. Linares, P. Multiple criteria decision making and risk analysis as risk management tools for power systems planning / P. Linares // IEEE Transactions on Power Systems. – 2002. – Vol. 17, N 3. – P. 895–900. DOI: 10.1109/TPWRS.2002.800991
18. Рыбак, В. А. Аналитический обзор технологий поддержки принятия решений / В. А. Рыбак, А. Шопр // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2016. – № 3. – С. 12–18.
19. Heavey, C. Process modelling support for the conceptual modelling phase of a simulation project / C. Heavey, J. Ryan // Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, December 3–6, 2006 / ed.: L. F. Perrone [et al.] ; Assoc. for Computing Machinery, Inst. of Electrical a. Electronics Eng. – New York ; Piscataway, 2006. – P. 801–808. <https://doi.org/10.1109/WSC.2006.323161>
20. Kim, S.-H. Selecting the best system: theory and methods / S.-H. Kim, B. L. Nelson // Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, December 7–10, 2003 / ed.: S. Chick [et al.] ; Assoc. for Computing Machinery, Inst. of Electrical a. Electronics Eng. – New York ; Piscataway, 2003. – Vol. 1. – P. 101–112. <https://doi.org/10.1109/WSC.2003.1261413>
21. Truong, T. H. Simulation based optimization for supply chain configuration design / T. H. Truong, F. Azadivar // Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, December 7–10, 2003 / ed.: S. Chick [et al.] ; Assoc. for

Computing Machinery, Inst. of Electrical a. Electronics Eng. – New York ; Piscataway, 2003. – Vol. 2. – P. 1268–1275. <https://doi.org/10.1109/WSC.2003.1261560>

22. Герасимович, Л. С. «Второе дыхание» электронного нагрева в агроэнергетике / Л. С. Герасимович // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 нояб. 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; ред.: М. А. Прищепов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 11–14.

23. Al-Aomar, R. A robust simulation-based multicriteria optimization methodology / R. Al-Aomar // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, December 8–11, 2002 / ed.: E. Yucesan [et al.] ; Assoc. for Computing Machinery, Inst. of Electrical a. Electronics Eng. – New York ; Piscataway, 2002. – Vol. 2. – P. 1931–1939. <https://doi.org/10.1109/WSC.2002.1166492>

24. Drew, S. S. Quasi-Monte Carlo strategies for stochastic optimization / S. S. Dew, T. Homem-de-Mello // Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, December 3–6, 2006 / ed.: L. F. Perrone [et al.] ; Assoc. for Computing Machinery, Inst. of Electrical a. Electronics Eng. – New York ; Piscataway, 2006. – P. 774–782. <https://doi.org/10.1109/WSC.2006.323158>

25. Fu, M. C. Simulation optimization: a review, new developments and applications / M. C. Fu, F. Glover, J. April // Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, December 4–7, 2005 / ed.: M. E. Kuhl [et al.] ; Assoc. for Computing Machinery, Inst. of Electrical a. Electronics Eng. – New York ; Piscataway, 2005. – P. 83–95. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574242>

References

1. Gusakov V. G., Gerasimovich L. S. (eds.). *Energy efficiency of agricultural production*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 775 p. (in Russian).

2. Rusan V., Khassan Eid. Technical and economic efficiency of using renewable energy sources. *Energetika i TEK* [Energy and fuel and energy sector], 2014, no. 11, pp. 38–41 (in Russian).

3. Gerasimovich L. S., Sapun O. L. Energy efficiency of the complex energy supply system for agro towns of the Republic of Belarus. *Aktual'ni problemi innovatsiinoi ekonomiki = Actual Problems of Innovative Economy*, 2018, no. 2, pp. 10–15 (in Russian).

4. Gusakov V. G. (ed.). *Economy of organizations and sectors of agro-industrial complex. Book 1*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2007. 891 p. (in Russian).

5. Gerasimovich L. S., Lankevich Yu. I., Sinen'kii A. V. Conceptual design of the system of complex energy supply of an agricultural settlement using local and renewable resources. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2014, no. 4, pp. 103–108 (in Russian).

6. Simankov V. S. (head). *Development of methodological guidelines for determining the efficiency of power supply systems for AIC facilities using NRES: research report (conclusion)*. Krasnodar, 1989. 204 p. (in Russian).

7. Simankov V. S., Zangiev T. T. *System analysis in solving structural problems of alternative energy*. Krasnodar, Institute of Modern Technologies and Economics, 2001. 151 p. (in Russian).

8. Gerasimovich L. S., Shesteren' V. E., Shul'ga V. A., Zhdanko A. L. Complex power supply of agrotowns of the Mogilyov region. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2009, no. 1, pp. 99–105 (in Russian).

9. Voitov I. V., Gatikh M. A., Rybak V. A. Scientific and innovative method for assessing and optimizing the management of environmental and economic efficiency of sustainable use of natural resources. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, 2008, no. 6, pp. 129–138 (in Russian).

10. Rybak V. A., Shokr A. Decision support system in the field of environmental management of industrial projects. *Scientific achievements of the third millennium: collection of scientific papers on materials III International scientific conference, San Francisco, 31 July 2016*. San Francisco, 2016, pp. 38–42. <https://doi.org/10.18411/scc2016-3-10>

11. Komashko V. N., Kostyukovich S. B., Lankevich Yu. I., Sinen'kii A. V. Principles of creating demonstration zones of high energy efficiency using local and renewable resources in the system of integrated energy supply of agricultural settlements. *Energeticheskaya strategiya* [Energy strategy], 2014, no. 6, pp. 49–54 (in Russian).

12. Sargent R. G. Verification and validation of simulation models. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, December 4–7, 2005*. New York, Piscataway, 2005, pp. 130–143. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574246>

13. Voropai N. I., Ivanova E. Yu. Multi-criteria analysis of decisions in the process of planning the development of electric power systems. *Elektrichestvo* [Electrical Technology], 2000, no. 11, pp. 2–9 (in Russian).

14. Bezrukikh P. P., Sidorenko G. I. The main methodological guidelines for the selection of demonstration objects of renewable energy (on the example of the Republic of Karelia). *Energeticheskaya politika* [Energy policy], 2004, no. 4, pp. 8–21 (in Russian).

15. Podkova'nikov S. V. Fuzzy payment matrix to justify decisions in the energy sector in conditions of uncertainty. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2001, no. 4, pp. 164–173 (in Russian).

16. Voropai N. I. Intelligent electric power systems: concept, state, prospects. *Avtomatizatsiya i IT v energetike* [Automation and IT in Power Industry], 2011, no. 3 (20), pp. 11–16 (in Russian).

17. Linares P. Multiple criteria decision making and risk analysis as risk management tools for power systems planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 895–900. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800991>
18. Rybak V. A., Shokr A. Analysis and comparison of existing decision support technology. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Information Science*, 2016, no. 3, pp. 12–18 (in Russian).
19. Heavey C., Ryan J. Process modelling support for the conceptual modelling phase of a simulation project. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, December 3–6, 2006*. New York, Piscataway, 2006, pp. 801–808. <https://doi.org/10.1109/WSC.2006.323161>
20. Kim S.-H., Nelson B. L. Selecting the best system: theory and methods. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, December 7–10, 2003*. New York, Piscataway, 2003, vol. 1, pp. 101–112. <https://doi.org/10.1109/WSC.2003.1261413>
21. Truong T. H., Azadivar F. Simulation based optimization for supply chain configuration design. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, December 7–10, 2003*. New York, Piscataway, 2003, vol. 2, pp. 1268–1275. <https://doi.org/10.1109/WSC.2003.1261560>
22. Gerasimovich L. S. “Second breath” of electric heating in agroenergetics. *Energoberezhenie – vazhneishee uslovie innovatsionnogo razvitiya APK: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Minsk, 23–24 noyabrya 2017 g.)* [Energy saving is the most important condition for the innovative development of agro-industrial complex: a collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference (Minsk, November 23–24, 2017)]. Minsk, 2017, pp. 11–14 (in Russian).
23. Al-Aomar R. A robust simulation-based multicriteria optimization methodology. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, December 8–11, 2002*. New York, Piscataway, 2002, vol. 2, pp. 1931–1939. <https://doi.org/10.1109/WSC.2002.1166492>
24. Dew S. S., Homem-de-Mello T. Quasi-Monte Carlo strategies for stochastic optimization. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, December 3–6, 2006*. New York, Piscataway, 2006, pp. 774–782. <https://doi.org/10.1109/WSC.2006.323158>
25. Fu M. C., Glover F., April J. Simulation optimization: a review, new developments and applications. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, December 4–7, 2005*. New York, Piscataway, 2005, pp. 83–95. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574242>

Інфармацыя аб аўторах

Герасімовіч Леонід Стэпанавіч – акадэмік, доктар тэхнічных навук, прафесар, галоўны навучны супрацоўнік, Інстытут энергетыкі, Нацыянальная акадэмія навук Беларусі (ул. Акадэміцкая, 15, корп. 2, 220072, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: leonger@tut.by

Сапун Оксана Леонідаўна – кандыдат педагогічных навук, дацэнт, заведуючая кафедрай інфармацыйных тэхналогій і мадэліравання эканамічных працэсаў, Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт (ул. Незавіскасці 99, 220023, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: osapun@yahoo.com

Сіненкі Аляксандр Уладзіміравіч – навучны супрацоўнік, Інстытут энергетыкі, Нацыянальная акадэмія навук Беларусі (ул. Акадэміцкая, 15, корп. 2, 220072, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: sinenki.alexander@gmail.com

Information about authors

Gerasimovich Leonid S. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor. Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b.2 Akademicheskaya Str., Minsk, 220072, Republic of Belarus). E-mail: leonger@tut.by

Sapun Oksana L. – Ph. D. (Pedagogical), Associate Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Str., Minsk, 220023, Republic of Belarus). E-mail: osapun@yahoo.com

Sinenki Alexander L. – Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus (15, b.2 Akademicheskaya Str., Minsk, 220072, Republic of Belarus). E-mail: sinenki.alexander@gmail.com